



연구단장/연구책임자 Kollbe Ahn UCSB 교수 (+1-785-236-1581) / 교신저자  
연구단/연구진 안진수 서울대 부교수 010-5263-3926 02-740-8691) / 공동 제1저자

## 치전원 안진수 교수 공동연구팀 해양 생물의 접착력을 치과치료에 응용 가능한 접착제 개발

### □ 치과치료, 해양생물은 이미 알고 있었다

- **홍합과 같은 해양 고착생물은 파도가 심하게 치는 바닷물에서도 바위에 강하게 붙을 수 있다.** 세계 많은 과학자들이 해양생물을 모방한 접착제 개발에 힘써왔으며, 다양한 성과들을 얻어냈으나 임상 응용 측면에서는 부족함이 있었다. 그런데 이번에 서울대-캘리포니아대 국제공동연구팀이 해양생물의 접착력을 실제 치료에 응용할 수 있는 나노 접착제를 개발하는 데 성공하였다.
- 해결의 실마리는 치과치료에서 나왔다. 치과의사는 타액이 많고 악조건인 구강에서 치아에 수복재료를 붙이기 위하여 산(酸)을 이용하여 치아표면을 준비하고 접착제가 잘 붙는 표면으로 바꾸기 위해 프라이머라는 표면처리를 한 후에 접착제를 붙인다.
- 홍합은 족사를 바위에 붙이기 위해 접착면을 산성상태로 만들어 표면을 준비하고 산화되기 쉬운 접착물질인 카테콜의 산화를 방지한다. 특히 연구진은 카테콜(미네랄 표면에 두 치아가 물리는 형태로, 동시에 두 개의 강력한 수소결합을 가능케 하는 페놀성 화학작용기) 함량이 홍합족사의 접착 표면에 집중된 것에 주목하였다.
- 이를 바탕으로 서울대 치의학대학원 안진수 교수팀은 해양생물 연구로 유명한 미국 캘리포니아 대학 산타바바라캠퍼스(UC Santa Barbara) 연구팀과 함께 생물 접착 메커니즘을 모사하여 치과치료에 이용할 수 있는 카테콜 프라이머를 개발하였으며, 이 프라이머가 1 나노미터(백만분의 일 센티미터) 두께로 표면에 흡착되는 특성을 발견하였다.
- 이 프라이머를 이용하면 현재 치과용으로 상용되고 있는 접착제들의 성능을 열 배 이상, 치과 수복재의 내구성을 50% 이상 증가시킬 수 있다는 것이 이번 연구를 통해 또한 밝혀졌다. 더욱이 독성시험 결과, 무독성으로 밝혀져서 생체용으로도 문제없이 사용이 가능할 것으로 연구진은 기대하고 있다.

## □ 융합연구를 통해 이루어낸 성과

- 이 연구가 시작된 계기는 치과의사이자 치과생체재료 연구자인 서울대학교 치의학대학원 안진수교수가 해양생물학 연구로 세계 최고수준으로 알려진 미국 캘리포니아주립대학 산타바바라캠퍼스에 방문교수로 가게 되면서 시작되었다. 카테콜의 화학적 특성이 사람의 치아에 활용하기에 적절한 것을 발견하자마자 분자합성 전문가 및 화학시뮬레이션 연구자들과 함께 기존의 치과용 접착 프라이머의 형태를 본 따서 새로운 프라이머 개발에 박차를 가하였으며, 수많은 시행착오를 거쳐 실제로 기능을 하는 단순화된 분자를 합성하는 데 성공하였다. 연구기간도 늘어나면서 안진수 교수는 1년의 연구년에 연수휴직 1년을 더해 가며 연구를 계속 이어나가는 노력을 기울였다.
- 치의학 분야에서 세계 최고수준의 연구 인프라를 갖춘 서울대학교 치학연구소의 도움으로 각종 실험재료와 박사급 연구자는 물론 장비까지 미국으로 공수해가며 다양한 실험을 진행한 결과, 충치치료에 사용되는 콤포지트 레진과 같이 단단한 고분자 재료에서도 프라이머를 적용함으로써 에너지소산효과를 관찰해내는 데에 성공하였다.
- 안진수 교수는 “이 나노접착/프라이머는 사람의 치아, 뼈 등의 경조직 및 임플란트 표면에도 잘 붙고 독성이 없으면서도 강력하고 터프한 특성이 있어서 생체표면처리제는 물론 깨지기 쉬운 현재의 치과용 수복재 등 다양한 치과재료에 사용될 경우 현대인의 치아건강을 더 오래 유지할 수 있을 것” 이라 전망하였다. 교신저자인 캘리포니아대 콜베 안(Kollbe Ahn) 교수 역시 “수많은 두 자리 수소결합들이 충격에너지를 소산(消散)시키는 분자구조를 세계최초로 무게를 지탱해야 하는 구조용 물질(치과용 수복재)에 응용하는 데 성공한 이 연구는, 기존에 주로 사용되어 왔던 에너지 소산능력이 없는 공유결합에 의존한 실란 표면처리를 대체할 경우, 치/의과용 및 반도체산업 등 다양한 분야에의 활용이 기대된다” 고 밝혔다.
- 주요 실험은 캘리포니아 대학에 근무하던 한국인 박사후 연구원들이 담당했는데, 그 중 공동 주저자인 서성백박사와 이동욱박사는 각각 부산대 바이오신소재과학과와 울산과기대 에너지 및 화학공학부에 교수로 임용되어 앞으로도 큰 발전이 기대되고 있다.
- 본 연구결과는 재료과학 및 신소재분야 세계 최고권위저널 중 하나인 어드밴스드 머티리얼즈 (Advanced Materials. IF: 19.79)에 게재될 예정이다.

- [붙임] 1. 연구결과      2. 용어설명      3. 그림설명  
4. 연구진 이력사항

## 연구결과

### Significant performance enhancement of polymer resins by bioinspired dynamic bonding

Sungbaek Seo, Dong Woog Lee, Jin Soo Ahn, Keila Cunha, Emmanouela Filippidi, Sung Won Ju, Eeseul Shin, Byeong-Su Kim, Zachary A. Levine, Roberto D. Lins, Jacob N. Israelachvili, J. Herbert Waite, Megan T. Valentine, Joan Emma Shea, and **B. Kollbe Ahn\***

(Advanced Materials (IF: 17.79), *accepted on June 23, 2017*)

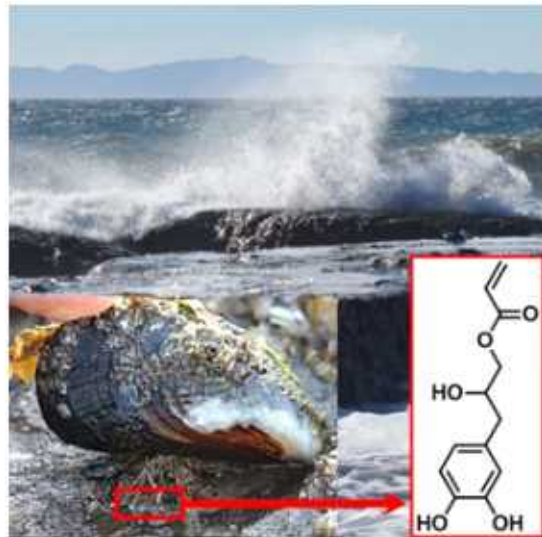
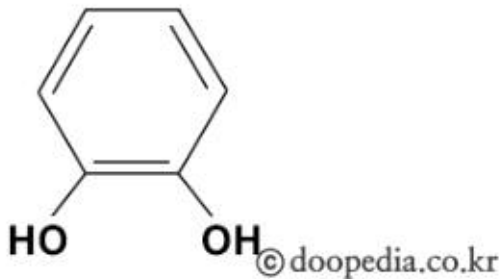
해양고착생물인 홍합은 카테콜이 풍부한 계면 홍합 발 단백질(mfps)을 프라이머로 이용하여 수소, 금속배위, 정전기, 이온 혹은 소수성 결합을 통해 홍합 발 단백질 자체에의 결합을 증진시키는 이차 표면을 생성한다. 이러한 생물학적 접착 프라이머에 영감을 받아 우리는 약 1nm 두께의 카테콜 단일분자 프라이밍 층이 미네랄 표면에서 기존의 카테콜이 함유되지 않은 실란 및 인산 기반 프라이머와 비교하여, 가교된 폴리메타크릴레이트(PMA) 레진에의 접착력을 증진시키는 것을 보였다. 분자 역동 시뮬레이션은 카테콜 그룹이 다양한 미네랄 표면에 결합하는 것을 확인 해주었고 각 분자들의 결합 양상을 명확히 보여주었다. 단단한 하중을 견디는 고분자 네트워크에서 50%에 이르는 인성 증가를 얻어냈으며, 구조재나 하중을 견디는 재료를 포함하여 넓은 범위의 고분자 계면을 처리하는 데에 홍합에서 영감을 받은 접착의 활용 가능성을 보여주었다.

# 용 어 설 명

## 1. 카테콜 (Catechol)

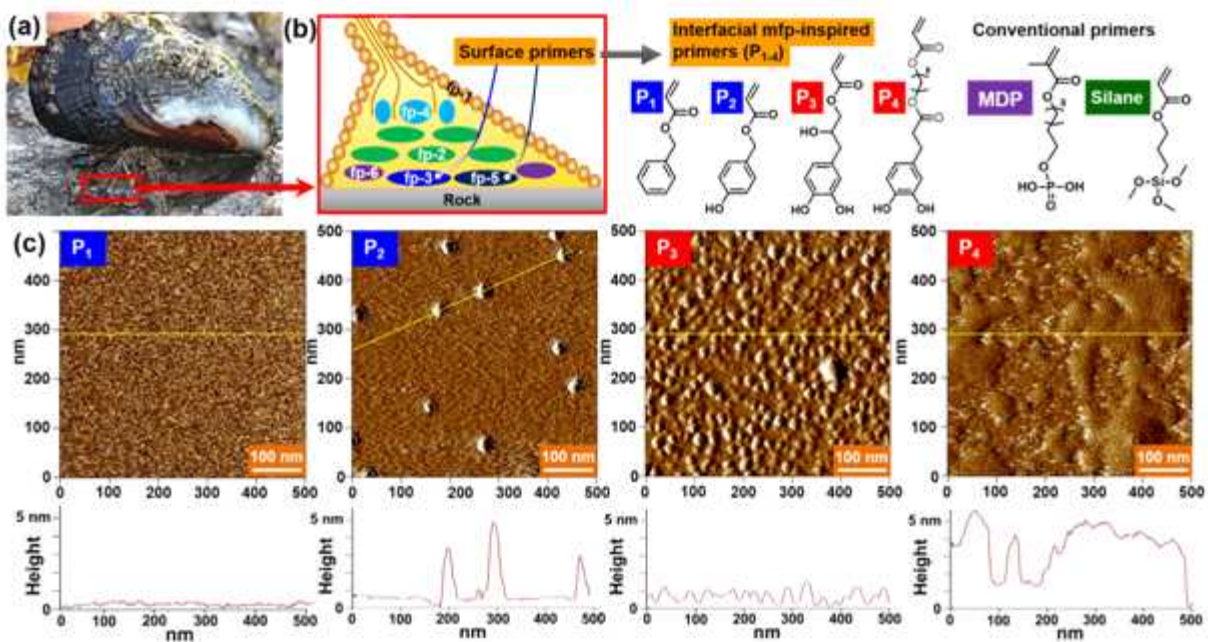
- Catechol (1,2-dihydroxybenzene). 아미노산인 타이로신 (tyrosine)이 타이로신 수산화 효소(tyrosine hydroxylase)에 의해 카테콜 계열의 L-도파로 변환된다. 홍합의 족사에 L-도파 (레보도파 또는 L-3,4-dihydroxyphenylalanine) 작용기가 다량함류되어 있으며, 이것이 수중접착의 중요한 역할을 한다는 것이 허버트웨이트 (Herber Waite) 교수 (캘리포니아대 산타바바라캠퍼스) 등의 생화학자들에 의해 밝혀졌다. 그 이후 카테콜을 이용한 다양한 합성물질이 Kollbe Ahn 교수 (캘리포니아대 산타바바라캠퍼스)등 신소재 연구자들에 의해 개발 및 연구되었다. 카테콜은 미네랄 표면에 두 치아가 물리는 형태 (bidentate)로, 동시에 두 개의 강력한 수소결합을 이룸으로써 수중에서도 강한 접착력을 발휘할 수 있도록 도움을 준다.

카테콜(catechol)  
화학식 :  $C_6H_4(OH)_2$



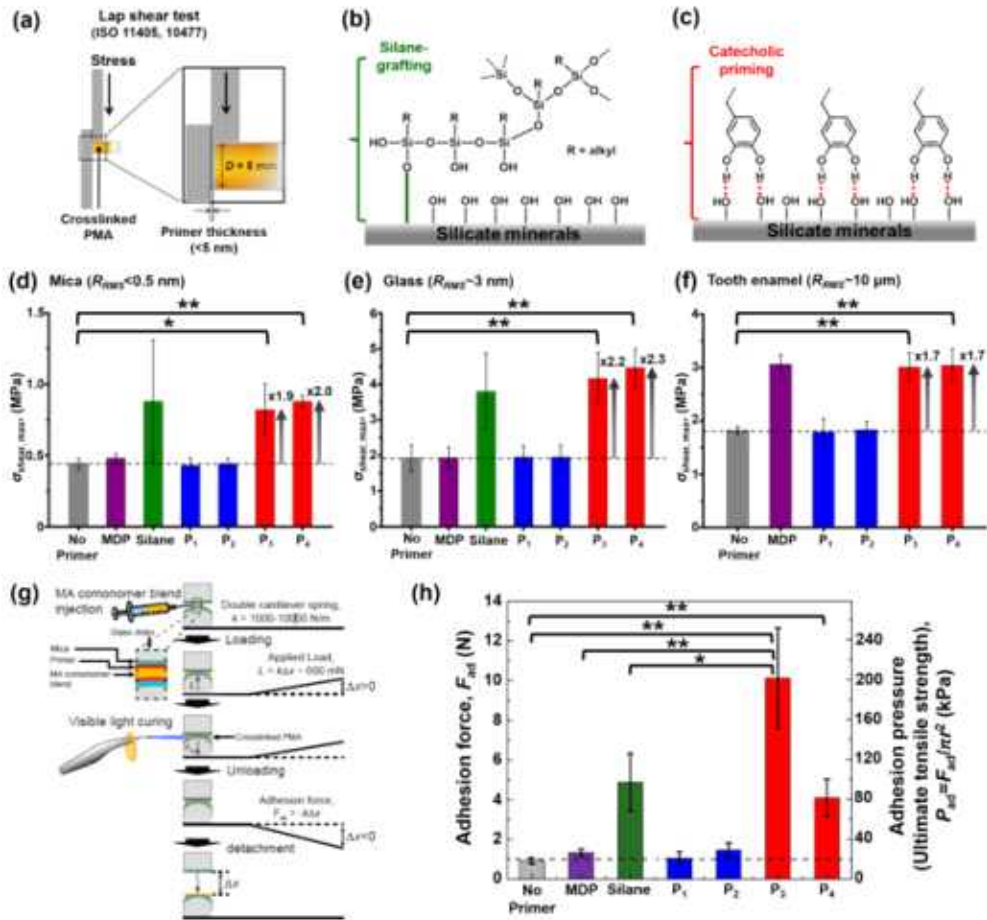
# 그림 설명

※ 연구성과를 도식화 할 수 있는 그림이나 표, 그래프가 있다면 추가 후 간략히 설명한다



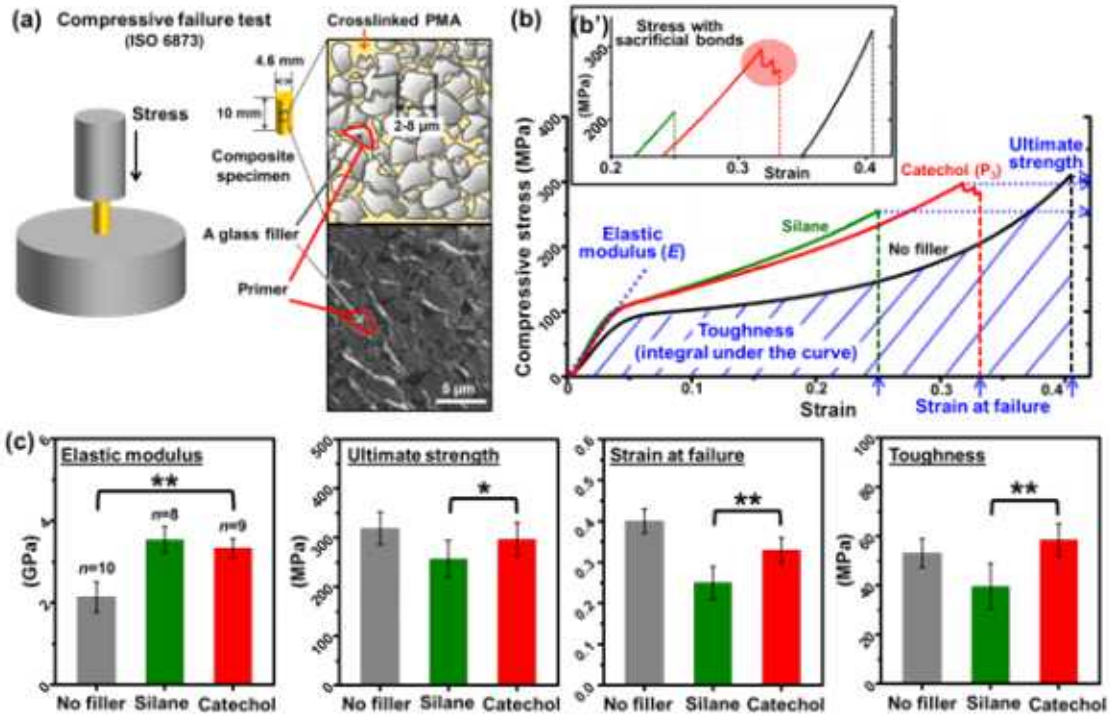
- (a) 캘리포니아 홍합이 죽사를 통해 바위에 붙어있는 모습
- (b) 죽사 끝 계면에 존재하는 홍합 발 단백질들 모식도 및 홍합을 생체모방하여 합성한 프라이머들 (P<sub>1</sub>~P<sub>4</sub>), 기존의 프라이머들 (MDP & Silane)의 화학구조
- (c) 운모 표면에 흡착된 프라이머들의 원자현미경 이미지와 표면돌출양상

이 결과를 통해 P<sub>3</sub> 프라이머를 처리한 경우 약 1나노미터 두께로 균일한 코팅이 형성되는 것을 알 수 있다.



- (a) 전단결합강도 측정
- (b) 유리표면에 처리된 기존의 실란 및
- (c) 카테콜 프라이머
- (d) 운모 표면에서 실란처리와 유사한 강도를 보이는 P3 및 P4 프라이머
- (e) 유리 표면에서도 실란처리보다 강한 강도를 나타내었다
- (f) 사람의 치아 법랑질 표면에서는 기존의 치과용 프라이머 MDP와 유사한 강도를 보여준다
- (g) SFA(표면힘측정기)로 순수한 접착력을 측정하는 모습
- (h) 접착력 측정결과 P3가 압도적으로 높은 수치를 보여준다

카테콜 프라이머가 다양한 미네랄표면 모두에서 접착력을 보여주며 접착력 또한 우수한 것을 알 수 있다.



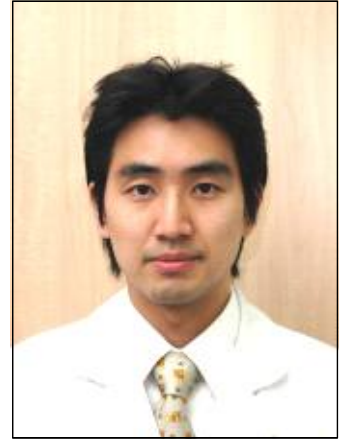
- (a) 압축강도 시험 모식도 및 P3 프라이머 처리된 유리필러를 레진기질과 혼합하여 만든 콤포지트 레진의 모습과 전자현미경 사진
- (b) 콤포지트의 응력-변형 곡선. 불규칙하게 하중이 감소되는 형태가 적색 원형에 나타나있다
- (c) 탄성계수, 최종강도, 변형량 및 인성을 나타낸 그래프

유리필러-레진기질 콤포지트에서는 유리필러를 이용하여 강도를 올릴 경우 변형이 적어지면서 인성이 낮아지는 데 반해(안 늘어나고 깨지는 성질), P3 프라이머 처리된 유리필러를 이용할 경우 탄성계수를 증가시키면서도 유연성이 증가하고 최종적으로는 인성까지 증가하는 결과를 얻어냈음

# 연구자 이력사항

## 1. 인적사항

- 소 속 : 서울대학교 치의학대학원 부교수
- 전 화 : 02-740-8691
- E-mail : ahnjin@snu.ac.kr



## 2. 학력

- 1993 - 1999 단국대학교 학사 (치의학)
- 2000 - 2002 단국대학교 석사 (치과보철학)
- 2005 - 2008 서울대학교 박사 (치과생체재료과학)

## 3. 경력사항

- 2005 - 2009 고려대학교 의료원 임상조교수
- 2009 - 2013 서울대학교 치의학대학원 조교수
- 2013 - 현재 서울대학교 치의학대학원 부교수
- 2015.2 - 2017.2 미국 캘리포니아주립대학 산타바바라캠퍼스 (UCSB) 방문교수

## 4. 기타 정보

- 선우양국 학술상(2014)